

Использование двухмассовой тепловой модели для выбора асинхронного двигателя

А.С. Анучин, К.Г. Федорова
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет МЭИ»,
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: anuchinas@mpei.ru KseniyaGFedorova@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Одномассовая тепловая модель, используемая в классических методах проверки двигателя, не удовлетворяет современным требованиям, так как рассчитана на неизменное соотношение потерь в статоре и роторе. В связи с этим необходима разработка модели, описывающей реальное тепловое состояние двигателя.

Материалы и методы: Используются результаты тепловых испытаний. Параметры модели рассчитаны экспериментально и с помощью метода наименьших квадратов.

Результаты: Предложена двухмассовая тепловая модель для описания теплового состояния асинхронного электродвигателя при частотном управлении. Описан способ экспериментального определения параметров двухмассовой тепловой модели.

Выводы: Предложенная модель позволяет моделировать тепловое состояние электродвигателя и может быть реализована с помощью численных методов.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, тепловая модель, выбор двигателя, проверка по нагреву.

Using Two-Mass Thermal Model for Asynchronous Engine Selection

A.S. Anuchin, K.G. Fedorova
National Research University of Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russian Federation
E-mail: anuchinas@mpei.ru KseniyaGFedorova@yandex.ru

Abstract

Background: The article is devoted to the one-mass thermal model which is used in classical methods of engine check and does not meet modern requirements because it is calculated at the constant relation of losses in the stator and rotor. Thus, it is necessary to design a model that describes the real thermal state of engine.

Materials and methods: The authors use the thermal test results. The model parameters were calculated experimentally using the method of least squares.

Results: The two-mass thermal model is proposed to describe the thermal condition of an asynchronous engine. The experimental method of parameters determination of the two-mass thermal model is considered.

Conclusions: The proposed model allows to simulate the thermal condition of the electric engine and can be implemented by means of numerical methods.

Key words: asynchronous electric engine, thermal model, engine selection, heating test.

Введение. Классические методы проверки двигателей по нагреву не меняются уже долгие годы и даже десятилетия. Они построены на базе примитивной одномассовой тепловой модели двигателя. Наиболее точно отражает тепловое состояние двигателя метод средних потерь, однако возможность его применения ограничена двумя факторами:

- необходимо знание потерь в электрической машине;
- одномассовая модель для определения перегрева регулируемого двигателя не подходит.

Потери могут быть рассчитаны с помощью модели двигателя при известных параметрах схемы замещения. С развитием персональных компьютеров и увеличением их мощности появилась возможность просчитывать модель двигателя на всем технологическом

цикле работы за секунды, получив графики токов, напряжения и потерь во времени. Это преимущество современных компьютеров и следует использовать при создании методов проверки двигателей по нагреву и энергоэффективности в будущем.

Двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя. Основной проблемой частотно-регулируемого электропривода становится неконтролируемый перегрев роторной цепи при изменении намагниченности машины на разных скоростях вращения. Следует учитывать ухудшение теплоотдачи между статором и ротором из-за пониженной скорости вращения частотно-регулируемого двигателя (роторные лопасти на низких скоростях вращения хуже перемешивают воздух и охлаждают лобовые части обмоток статора). Кроме того, на пониженной скорости ухудшается теплоот-

дача в окружающую среду. Поэтому одномассовая модель непригодна для большинства частотно-регулируемых применений.

В отечественной и иностранной литературе приводятся результаты исследований многомассовых тепловых моделей [1, 2], построенных на принципе разделения меди статора, лобовых частей обмоток, самих обмоток и т.д. вплоть до представления электрической машины методом конечных элементов. Но при большом числе компонентов такой модели установить экспериментальным или расчетным путем ее параметры очень сложно. Поэтому ряд авторов предлагают упростить модель, сохранив две массы [3, 4].

На рис. 1 представлена предлагаемая тепловая модель асинхронного двигателя (АД).

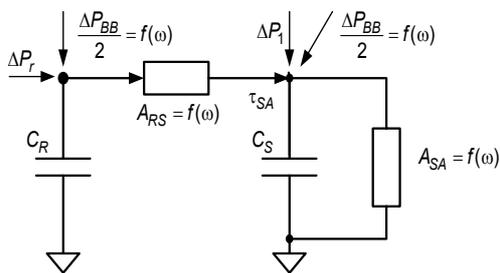


Рис. 1. Двухмассовая тепловая модель АД

По сравнению с обычной двухмассовой моделью, представленной в [3], параметры тепловой проводимости в предложенной модели между статором и ротором и между статором и окружающей средой являются величинами переменными от скорости вращения. Самовентилируемый двигатель изменяет свою теплоотдачу со статора в зависимости от скорости вращения. Также теплообмен между статором и ротором имеет разную эффективность на разных скоростях вращения из-за того, что он в основном определяется теплопередачей через воздух зазора. При высокой скорости вращения интенсивность теплообмена возрастает с увеличением скорости перемешивания воздуха.

Таким образом, предлагаемая модель имеет две однородные массы статора и ротора. Потери возникают в статоре ΔP_s и роторе ΔP_r . Кроме электрических потерь в двигателе, есть механические потери в подшипниках, которые в рамках данной модели будут разделены пополам и подведены к статору и ротору. Примем допущение, что ротор отдает энергию только на статор через зазор и имеет крайне низкую теплоотдачу вовне, минуя статор [3]. Между собой статор и ротор обмениваются энергией через теплопроводность $A_{sr}(\omega)$, являющуюся зависимостью от скорости вращения, а статор связан с окружающей средой теплопроводностью $A_{sa}(\omega)$, также зависящей от скорости. Структурная схема тепловой модели представлена на рис. 2.

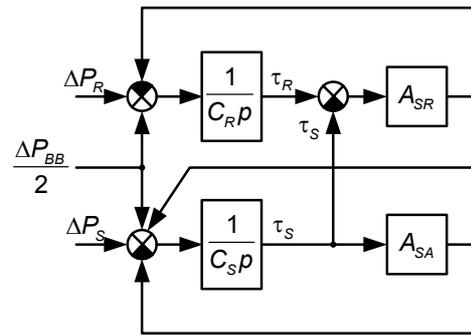


Рис. 2. Структурная схема двухмассовой тепловой модели АД

Статор и ротор в модели представлены равномерно нагретыми телами. Это грубое допущение, но если установить датчик температуры в конкретную точку статора и определить ее температуру в номинальном режиме работы электродвигателя, то эта точка может являться опорной для оценки перегрева всей модели. Тогда получаем номинальный перегрев статора, снятый экспериментально, и номинальный перегрев ротора, вычисленный по модели. Любое превышение температуры модели при проверке двигателя выше этих параметров по модели будет означать, что двигатель перегрет более допустимого уровня.

Методика экспериментального определения параметров тепловой модели. Приведенная тепловая модель является достаточно полной и в то же время простой, однако и для нее необходимо проведение большого числа опытов, чтобы достаточно точно вычислить необходимые параметры.

Для нахождения потерь в подшипниках с двигателя необходимо снять вентилятор и поместить двигатель в рубашку из теплоизоляционного материала, чтобы ухудшить коэффициент теплоотдачи и сделать его не зависящим от скорости вращения.

Разделив подводимую мощность на перегрев относительно окружающей среды, получим теплопроводность статора в окружающую среду с теплоизоляционной рубашкой:

$$A_{sa\ shielded} = \frac{\Delta P}{\tau}. \quad (1)$$

Далее с помощью нагрузочной машины выводим двигатель на некоторую скорость вращения. Все потери в двигателе определяются механическими потерями (в основном в подшипниках), которые на разных скоростях будут определяться по формуле

$$\Delta P_{bb}(\omega) = A_{sa\ shielded} \tau(\omega). \quad (2)$$

Задавая определенную мощность и дожидаясь установившегося режима работы на некоторой скорости вращения двигателя, приводимого в движение от нагрузочной машины, можно произвести снятие кривой коэффициен-

та теплоотдачи статора в окружающую среду $A_{sa}(\omega)$, который рассчитывается по формуле

$$A_{sa} = \frac{\Delta P_{зад}}{\tau_{уст}}. \quad (3)$$

Для определения теплоемкостей статора и ротора и коэффициента теплоотдачи между статором и ротором можно применить метод наименьших квадратов. Для определения параметров модели необходимо осуществить перебор значений параметров C_s , C_r , A_{rs} во всем разумном диапазоне с некоторым шагом. В процессе перебора по схеме рис. 2 производится моделирование поведения системы и полученные модели сравниваются с данными опыта нагрева. Интеграл квадрата ошибки позволяет судить о достоверности текущих параметров тепловой модели и вычисляется по формуле

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} (\tau_i - \hat{\tau}_i)^2, \quad (4)$$

где N – количество измерений температуры статора двигателя за время опыта T ; τ_i – измеренная температура статора двигателя в момент времени $i \frac{T}{N+1}$; $\hat{\tau}_i$ – оценка температуры статора по модели.

Применение двухмассовой модели при выборе электродвигателя. Исходными данными для выбора двигателя являются нагрузочная диаграмма и тахограмма работы механизма. Кроме того, следует знать некоторые особенности структуры системы управления преобразователя частоты, от которого предполагается производить питание двигателя (настройка зависимости напряжения от частоты, алгоритмы IR -компенсации, темп задатчика интенсивности и др.).

Сами по себе перегревы ротора и статора ничего не говорят о реальном перегреве двигателя, так как все параметры модели получены для одной точки статора, где происходило измерение температуры. В статоре и роторе в это время будут как более нагретые, так и менее нагретые участки. Однако определить граничный перегрев можно и для одной точки, если предположить, что распределение температур для различных режимов работы двигателя не меняется сильно. Тогда для номинального режима работы двигателя можно получить значения номинального перегрева статора и ротора в системе координат используемой двухмассовой тепловой модели. Эти температуры, вычисленные для установившегося

Анучин Алексей Сергеевич,
ФГБОУВПО «НИУ «МЭИ»,
кандидат технических наук, зав. кафедрой АЭП,
телефон +74953627151,
e-mail: anuchinas@mpei.ru

режима, и могут быть границей, выше которой подниматься не следует.

Заключение

Предложенная двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя пригодна для численного моделирования тепловых процессов при частотном управлении. Такой подход позволяет без ограничений рассматривать тепловые режимы электродвигателя независимо от способа регулирования, типа нагрузки и времени цикла механизма. В отличие от методов эквивалентных величин, предложенный способ обеспечивает оценку использования двигателя на производственных циклах любой протяженности, так как оперирует не средними, а мгновенными значениями. Данная модель учитывает процесс отдельного нагрева ротора и статора, что позволяет строить защиту не только статорных, но и роторных цепей.

Предложенная методика экспериментального определения параметров двухмассовой тепловой модели позволяет определять параметры на всех скоростях вращения двигателя, в силу того что многие из них являются переменными в функции скорости.

Список литературы

1. **Thermal** Overload Capabilities of an Electric Motor and Inverter Unit Through Modeling Validated by Testing, Henning Lohse-Busch / Virginia Polytechnic Institute and State University. – 2004. – P. 70.
2. **Thermal** modelling of small cage induction motors, Gunnar Kylander / Chalmers University of Technology. – 1995. – P. 113.
3. **Sensorless** stator winding temperature estimation for induction machines, Zhi Gao / Georgia Institute of Technology. – 2006. – P. 204.
4. **Математические** модели нагрева и охлаждения асинхронных двигателей для микропроцессорного реле тепловой защиты / Г.А. Бугаев, А.И. Леонтьев, Е.Ю. Ерохин и др. // *Электромеханика*. – 2001. – № 2. – С. 51–54.

References

1. Thermal Overload Capabilities of an Electric Motor and Inverter Unit Through Modeling Validated by Testing, Henning Lohse-Busch, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. 70 p.
2. Thermal modelling of small cage induction motors, Gunnar Kylander, Chalmers University of Technology, 1995. 113 p.
3. Sensorless stator winding temperature estimation for induction machines, Zhi Gao, Georgia Institute of Technology, 2006. 204 p.
4. Bugaev, G.A., Leont'ev, A.I., Erokhin, E.Yu. Matematicheskie modeli nagreva i okhlazhdeniya asinkhronnykh dvigateley dlya mikroprotssessornogo rele teplovoy zashchity [Mathematical Models of Heating and Cooling of Asynchronous Engines for Microprocessor Relay of Thermal Overload Protection]. *Elektromekhanika*, 2001, no. 2, pp. 51–54.

Федорова Ксения Георгиевна,
ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет МЭИ»,
аспирант, ассистент кафедры АЭП,
телефон +79035689024,
e-mail: KseniyaGFedorova@yandex.ru